

周期的な漏えい機構を有する伝送線路の特性に関する研究

著者	坂柳 成功
号	88
発行年	1965
URL	http://hdl.handle.net/10097/8824

氏 名 (本 籍)	坂 柳 成 功 (愛 知 県)		
学 位 の 種 類	工 学 博 士		
学 位 記 番 号	工 博 第 8 8 号		
学位授与年月日	昭和 4 1 年 3 月 2 5 日		
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当		
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻		
学 位 論 文 題 目	周期的な漏えい機構を有する伝送線路の 特性に関する研究		
論文審査委員	(主 査)		
	教授 西田 茂 穂	教授 内田 英 成	
	教授 虫 明 康 人	教授 高 久 浩 俊	

論 文 内 容 要 旨

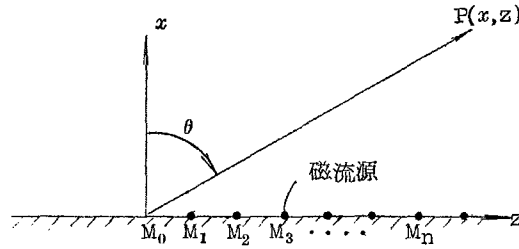
第 一 章 緒 論

本研究は、周期的な漏えい機構を有する伝送線路の特性を電磁波論的に考究したものである。考察の主眼は、線路から漏えいする電磁波の漏えい機構を明らかにすることにおかれ、漏えい波の放射現象を Leaky Wave の概念を用いることにより理論的に明確にしている。又その結果を用いて漏えい伝送線路の伝搬特性を理論解析し、それを実験的に考察検討している。本論で取扱った構造は、平行板伝送線にスリットを周期的に設けたものである。

第二章 周期列源による電磁界

図1に示す半無限周期列磁流源による $x \geq 0$ の領域における磁界 H_y は、Maxwell の方程式から、

$$H_y = -\frac{M_0 k_0^2}{2\omega\mu_0} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-r\ell n - j\delta n} H_0^{(2)} [k_0 \sqrt{x^2 + (z - z' - n\ell)^2}] \quad (1)$$



$$M_n = M_0 e^{-r\ell n - j\delta n} i_y$$

r ; 減衰定数

δ ; 位相差

図1. 半無限周期列源

で与えられる。ここに、 δ は波源間の位相差、 r は波源の振幅を決める減衰定数である。

(1)式を系の周期性を強調した形に変形すると

$$H_y = -\frac{M_0 k_0^2}{2\omega\mu_0} \left\{ \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{e^{-j\sqrt{k_0^2 - k_z^2}x - jk_z(z-z')} dk_z}{[r\ell + j(\delta + 2m\pi - k_z\ell)]\sqrt{k_0^2 - k_z^2}} + \frac{1}{2} H_0^{(2)} [k_0 \sqrt{x^2 + (z - z')^2}] \right\} \quad (2)$$

となる。右辺第二項は系の不連続性に起因するもので円筒波を表わす。一方、 k_z に関する積分の項を \hat{H}_y とすれば \hat{H}_y は k_z の複素平面上で考察することにより連続スペクトルを有する波 $H_y^{(s)}$ と極による寄与 $H_y^{(p)}$ とに分けられて、

$$\hat{H}_y = H_y^{(s)} + H_y^{(p)} \quad (3)$$

とおくことが出来る。

具体的に $H_y^{(s)}$ を求めると、遠方領域では $k_0\rho \gg 1$ の仮定のもとに鞍部点法により、

$$H_y^{(s)} \cong -\frac{M_0 k_0^2}{2\omega\mu_0} \frac{e^{-jk_0\rho + j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi k_0\rho}} \coth \frac{1}{2} [r\ell + j(\delta - k_0\ell \sin\theta)] \quad (4)$$

となり、又、近接領域においては $k_0 x \ll 1$ 、 $k_0 z > 1$ の仮定のもとに、

$$H_y^{(s)} \simeq - \frac{M_0 k_0^2}{\omega \mu_0} \frac{e^{-jk_0(z-z')} + j \frac{\pi}{4}}{\sqrt{2\pi k_0(z-z')}} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1}{A_m} + \sum_{\tau=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{A_m} - j \frac{k_0}{l} x^2 \right) \right. \\ \left. \times \frac{(-1)^\tau \Gamma(\tau + \frac{1}{2})}{[\sqrt{-A_m (\frac{z-z'}{l})}]^{2\tau}} \right\} \quad (5)$$

で与えられる。但し、

$$A_m = r l + j(\delta + 2m\pi - k_0 l) \quad (6)$$

である。 $H_y^{(p)}$ は留数計算から

$$H_y^{(p)} = - \frac{M_0 k_0^2}{\omega \mu_0} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{e^{-jk_0 \rho \cos(a_{pm} - \theta)}}{k_0 l \cos a_{pm}} U(\theta, \theta_{cm}) \quad (7)$$

となる。ここで $U(\theta, \theta_{cm})$ は臨界観測角 θ_{cm} によってきまる Step 関数で次の定義に従うものである。

$$U(\theta, \theta_{cm}) = \begin{cases} 1, & \theta \geq \theta_{cm} \\ 0, & \theta < \theta_{cm} \end{cases} \quad (8)$$

そして、

$$\sin a_{pm} = -j \frac{r}{k_0} + \frac{\delta + 2m\pi}{k_0 l}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9)$$

である。

以上のことから、周期列源によって励振される波は、(1)系の不連続性に起因する波、(2)連続ベクトルを有する波 $H_y^{(s)}$ 、(3)極の寄与 $H_y^{(p)}$ の三つの波によって構成されることが明らかとなった。

ところで、極の寄与 $H_y^{(p)}$ は “eigen mode”¹⁾ と呼ばれるものであって、周期構造における空間高調波に対応するものとなっている。本論ではこれを固有伝送波と呼んでいる。この固有伝送波は(7)式から判るように、波源の周期 l 及び位相差 δ によって特徴づけられるもので、その伝搬特性から(1)前進速波 (2)後進速波 (3)前進遅波 (表面波) (4)後進遅波の四型態に分類される。これらのうち、(1)、(2)は波源面から上方向にエネルギーを伝送する波であることから、放射波に関係するもので Leaky Wave と呼ばれる。²⁾ 一方、(3)、(4)は主として波源面に沿って伝搬する伝送波形態の波で直接放射には関係なく、むしろ、波源近傍でのリアクティブな電力を形成するものである。

第三章 周期列源による放射現象とLeaky Wave との関係について

前章での理論解析の結果、周期列源によって励振される電磁界には、固有伝送波が存在することが判ったが、この固有伝送波と放射現象との関係を更に詳しく検討する。

波源面近傍における磁界は $H_y^{(s)}$ 、 $H_y^{(p)}$ 及び系の不連続性に起因する円筒波によって表わされるが、これらは波源面に限りなく接近した状態で波源に結びつく表示でなければならない。これを(5)、(7)式を用いて吟味すれば $H_y^{(p)}$ のみが直接波源に結びつくものであることが判る。このことは、波源面近傍での電磁界は固有伝送波によって大きく支配されていることを示すものである。従って、先に導出された円筒波成分 $H_y^{(s)}$ は波源から励振された平面波が波源面から離れて行くに従って徐々に回折された結果生じたものであるという重要な結論が得られる。この結論の妥当性は波源面近傍の干渉現象を調べることにしても裏付けされる。即ち、先の理論解析によれば、波源面から数波長乃至十数波長離れた領域での磁界は固有伝送波のうちのLeaky Waveと系の不連続性に起因する円筒波によって表わされる。従ってこの領域では異質の二つの波が共存し両者による干渉縞が観測される。この観点に立って理論的に干渉縞を計算し、且つ、それを実測値と比較を行った。(図2)

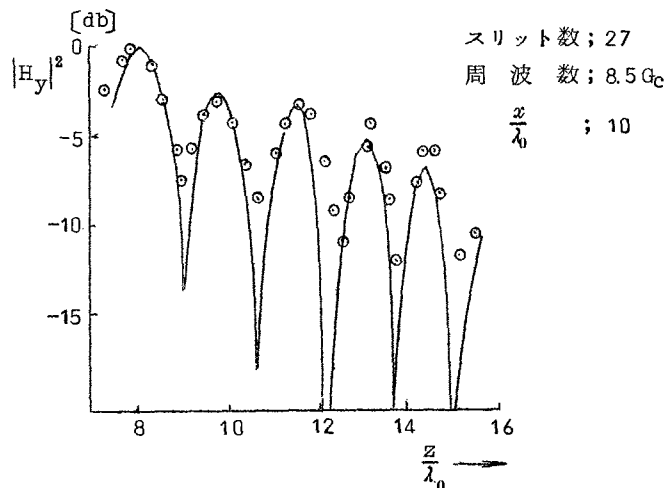


図2. 不連続部による円筒波と
Leaky Waveとの干渉パターン

図2から理論値と測定値とが非常によく一致することが認められる。

更に、遠方領域の電磁界に言及すれば、この領域では円筒波成分のみである。しかしながら、その放射指向特性に現われる鋭い放射ビームの方向がLeaky Waveの放射方向と近似的に一致することから、遠方領域の電磁界は固有伝送波のうちのLeaky Waveによって形成されるものであることが明らかになる。事実、Leaky Waveを用いてKirchhoff-Huygensの原理より求めた放射指向特性はArray理論から計算したそれと高い近似度で一致する。

以上のことから、周期列源による電磁界の放射現象は固有伝送波のうち、特に、Leaky Waveにより、明確に説明できることが判った。

第四章 周期的な漏えい機構を有する伝送線路の伝搬特性

前章までの放射現象に関する議論は線路に設けられた各スリットにおける電界分布を仮定して行なわれたが、その分布はスリットを励振する伝送線路を考慮した系全体として境界条件を満足するように決定されるべきものである。そこで、本章ではスリットにおける波源分布をきめるために線路の伝搬定数を決定している。

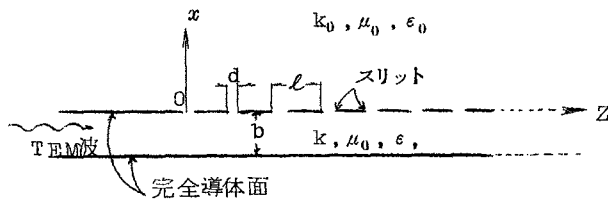
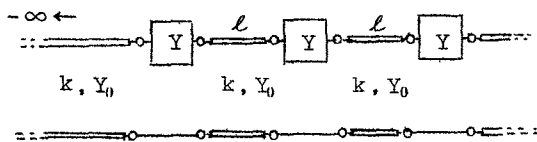


図3: 周期的な漏えい機構を有する平行板伝送線路



Y; スリット部を表わす等価アドミッタンス
Y₀; 線路の特性アドミッタンス

図4. 図3の等価回路

〔理論解析〕

図3に示す構造はスリット部をこれと等価なアドミタンスで表わすことにより、図4の等価回路におきかえることができる。スリット部を表わす規格化等価アドミタンス Y' は $k_0 d \ll 1$ の仮定のもとに変分法によって求められ、これを外部電磁界によるもの Y'_{ext} と内部電磁界によるもの Y'_{int} に分けて

$$Y = Y'_{\text{int}} + Y'_{\text{ext}} \quad (10)$$

と表わすと、

$$Y'_{\text{int}} \simeq -j \frac{k^3}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{d}{k_i^2} - \frac{1}{k_i^3} (1 - e^{-k_i d}) \right] \bigg/ \sin^2 \frac{kd}{2} \quad (11)$$

$$Y'_{\text{ext}} \simeq \frac{b}{4\sqrt{\epsilon_s}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2(\frac{k_0 d}{2} \sin \alpha_{pm})}{\cos \alpha_{pm} \sin^2 \alpha_{pm}} \bigg/ \sin^2 \frac{kd}{2} \quad (12)$$

で与えられる。但し、

$$\sin \alpha_{pm} = \frac{\Gamma_Z \ell + 2m\pi}{k_0 \ell}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (13)$$

$$K_i^2 = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{i\pi}{b}\right)^2}, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

である。ここで Y'_{ext} の計算にあたって、前述の固有伝送波表示が用いられている。この表示の特徴は、 Y'_{ext} が固有伝送波に対応した表示であることから伝送線路と放射現象との関連性が極めて明瞭となることである。例えば、Leaky Wave は $|\sin \alpha_{pm}| < 1$ に対応するものであるがこれに対して Y'_{ext} はコンダクタンス分を呈し、 $|\sin \alpha_{pm}| > 1$ となる遅波に対してはサセプタンス分を示す。又、 $|\sin \alpha_{pm}| \simeq 1$ のとき $Y_{\text{ext}} \rightarrow \infty$ となりスリットが恰も短絡された状態を呈する。特に、 Y'_{ext} が無限大となるのはスリット相互間の相互結合の影響によるものであってLeaky Wave の概念を導入することによってその取扱いが容易となったものである。この状態でのスリット間隔及び波長の関係は光の回折格子におけるWood's anomalies³⁾と呼ばれる特異現象が生ずるときと同様な関係にあり、このときの波長はRayleigh wavelength に一致している。

伝搬定数 Γ_Z は、図4の等価回路から回路網理論によって次の決定方程式から求めることができる。

$$\cos \Gamma_Z \ell - \cos k \ell - j \frac{\sin k \ell}{Y'(\Gamma_Z)} = 0 \quad (15)$$

これは Γ_Z に関する超越方程式であるが、 $k_0 d \ll 1$ と仮定して

$$\Gamma_Z = k + \Delta\Gamma_Z \quad (16)$$

とおくと、摂動法により

$$\Delta\Gamma_Z \simeq \frac{1}{j2Y'(k)\ell} \quad (17)$$

と求まる。ここで k はスリットのない状態での伝搬定数である。興味のあるのは減衰定数 Γ であるがこれを数値例によって示すと図5のようになる。

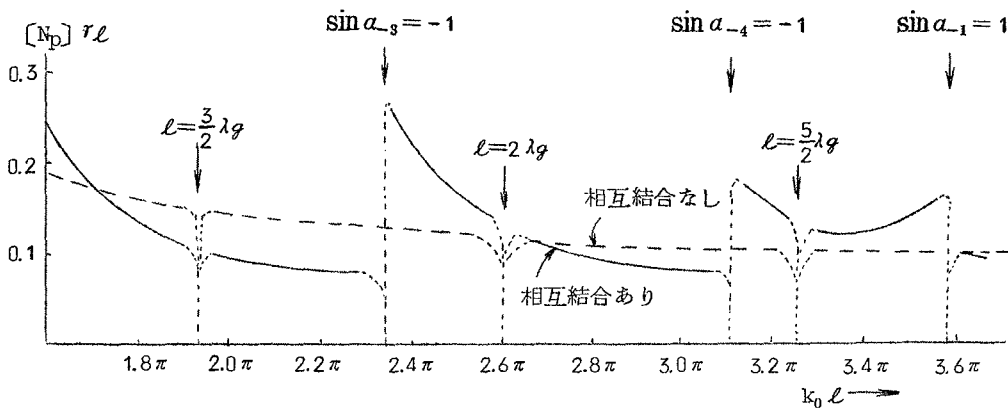


図5. 減衰定数の周波数特性

図5で $k_0 \ell = 2.32\pi, 3.1\pi, 3.55\pi$ のところで減衰定数が零となりその近傍で急激な変化をしていることが判る。これらは(13)式で $|\sin \alpha_{pm}| = 1$ となる場合に相当するが、このとき $Y_{ext} \rightarrow \infty$ となることからスリットが恰も短絡された状態となり、線路から外部にエネルギーが放射されない。物理的には各スリット上の合成電界が零になるためと考えられる。この現象は Leaky Wave が遅波に移行する場合に現われ、上述の Wood's anomalies の状態に一致する。尚、 $k\ell = n\pi$ で減衰定数が零となるのは、線路内に定在波が生じその節点とスリットの位置とが一致するためスリットによって放射される電磁波が存在しないことによるものと説明される。

[実験的考察]

上の理論で明らかにされた減衰定数の周波数に対する特異性を実際に確かめるため、モデル実験を行った。被測定線路は誘電体材料を装荷した平行線路にスリットを設けたもので線路は Horn reflector antenna で励振されている。スリットの周期 ℓ は(13)式で $m = -1$ に対して

$\sin \alpha_{-1} = 1$ となるように選び測定は 10 Gc 帯で行った。図 6 に測定結果を示す。実測値が理論値とよく一致していることが判る。

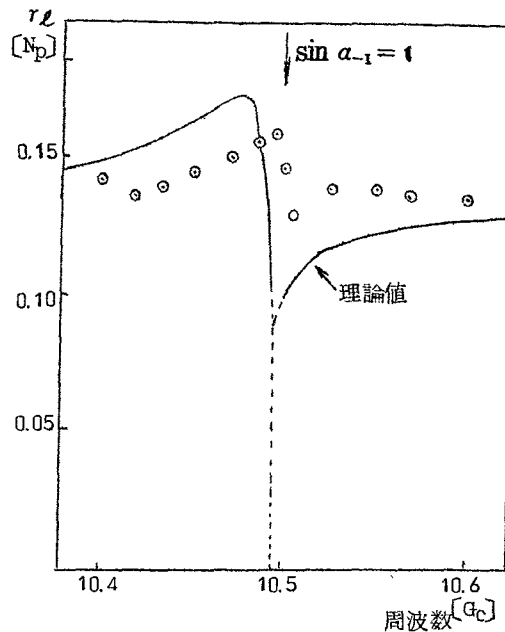


図 6. 減衰定数の周波数特性（理論値と測定値）

これらのことから、周期的な漏えい機構を有する伝送線路の伝搬定数は周期構造なるがために或る特定の周波数で急激な変化をすることが理論的、実験的に明らかとなった。

第五章 Anomalies に対する対策の提案

上述の伝搬特性の周波数に対する特異性は、実用上大きな障害となるがその対策として、二の提案を行っている。

第六章 結 言

周期的な漏えい機構を有する伝送線路から漏えいする電磁波の放射現象が Leaky Wave の概念を導入することにより理論的に明らかとなった。又、線路内を伝搬する電磁波の伝搬特性を相互結合の影響を考慮して理論解析することにより、従来、相互結合を無視した解析において見出されなかった周期構造に特有な特異現象の解明が可能となった。

最後に、本研究を行うに当り終始御指導御教示を賜った西田教授に衷心より御礼申し上げますと共に、熱心な御検討と有益な助言を頂いた米山助教授に深く感謝の意を表する次第です。

文 献

- 1) N. Marcuvitz, "On the Field Representations in Terms of Leaky Modes or Eigenmodes,"
IRE Trans. on AP, vol. AP-4, No. 3, July, 1956.
- 2) T. Tamir and A. A. Oliner,
"Guided complex waves: Part I, Part II,"
Proc. IEE., vol. 110, No. 2, Feb., 1963.
- 3) C. H. Palmer, "Diffraction Anomalies with Millimetric Wave Gratings,"
Proc. Symp. on Quasi-Optics, N. Y., 1964.

審 査 結 果 の 要 旨

伝送線路に適当な間隔の周期的漏えい機構を設けたものは、従来、一種の進行波型アンテナとして知られており、任意の方向に放射ビームを作り得る有用なアンテナである。一方、これを伝送線路としての立場からみると、僅かづつエネルギーを漏えいしてゆく構造のために、この線路には減衰する伝送波の存在が考えられ、このような伝送波は Leaky Wave の概念に通ずるものである。著者はこの観点に立って周期的な漏えい機構を有する伝送線路の漏えい放射の機構、放射波の特性および放射を伴う伝送波の特性をできるだけ厳密に解析し、Leaky Wave の概念を用いて従来不明確であった周期漏えい機構からの放射現象を定量的に解明し、その設計理論を確立することを企図している。

本論文は6章よりなり、第1章は緒論である。第2章は半無限の周期列源によって生ずる電磁界の特性を一般的に論じたもので、電磁界の平面波集合表示から Leaky mode を含む固有伝送波を抽出して源の近傍および放射波を形成する遠方の電磁界を正しく評価している。第3章は前章で得た Leaky Wave と放射波との関連を明らかにしたもので、放射電磁界が Leaky mode のみで、高い近似度で表示し得ることを示し、源近傍の干渉縞を計算して実測で確かめ、Leaky Wave が放射の主役を演ずることを証明している。第4章は周期列源を励振する伝送線路について論じたもので、放射と関連する伝送波がもつ特性を明らかにしている。これによって漏えい放射と線路内の伝送波との関係が定量的に解明され、従来十分でなかった Leaky Wave アンテナとしての設計理論が確立された。また、この解析によって、光の回折現象で実験的に見出されていた回折波の特異現象、Wood's Anomaly と全く同種の特異現象の存在が確認され、これを実測によって証明している。この実験結果は未だ他に例を見ないものである。第5章は上記の特異現象に対する実用上の対策を述べたものである。第6章は結言である。

以上の通り、周期的漏えい機構をもつ伝送線路が Leaky Wave アンテナとして動作することを定量的に解明し、その設計理論を確立した。これは電波工学の進歩に貢献するところが大きい。

よって本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。